

УДК 551.510.522:532:526

ИОНИЗАЦИЯ ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ ИЗЛУЧЕНИЕМ ПОЧВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ

В.В. Зукау*, В.С. Яковлева*, В.Д. Каратаев*, П.М. Нагорский***

*Томский политехнический университет

**Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск

E-mail: vsyakovleva@tpu.ru

Представлены результаты моделирования вертикального профиля плотности ионизации приземного слоя атмосферы, обусловленного радиоактивным распадом почвенных радионуклидов. Моделирование плотности ионизации в атмосферном воздухе ионизирующим излучением проведено методом Монте-Карло. При моделировании учтено вторичное излучение и каскадный характер взаимодействия излучения с воздухом. Для проведения расчетов создана библиотека из 40 основных радионуклидов, повсеместно присутствующих в почвах и грунтах. Моделирование произведено в условиях векового радиоактивного равновесия между родоначальниками семейств и дочерними продуктами их распада.

Ключевые слова:

Радионуклид, грунт, моделирование, излучение, ионизация, атмосфера, уран, торий, калий, цезий.

Key words:

Radionuclide, soil, simulation, radiation, ionization, atmosphere, uranium, thorium, potassium, cesium.

Почва — наиболее значимый источник полей ионизирующих излучений, создающий дозовую нагрузку на все объекты, расположенные на поверхности земли, в том числе и на атмосферный воздух. Почва служит основным «депо» долгоживущих радионуклидов естественного и техногенного происхождения. [1]. Естественные радиоактивные элементы находятся в рассеянном состоянии во всех объектах биосферы. Основными из этих элементов являются ^{235}U , ^{232}Th , ^{226}Ra (^{238}U) и дочерние продукты их распада, а также ^{40}K , ^{87}Rb . Кроме того, в окружающей среде накапливаются достаточно долгоживущие радионуклиды ^{14}C и ^3H , появляющиеся в ядерных реакциях атмосферных газов с космическими лучами и вступающие в элементный обмен в биосфере. Из техногенных радионуклидов следует отметить накопление в почве долгоживущего осколочного гамма-радионуклида ^{137}Cs , образующегося в ядерных реакциях деления сверхтяжелых химических элементов. Для почв на территории г. Томска массовые содержания радионуклидов ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K и ^{137}Cs в приповерхностных грунтах и в почве колеблются в пределах 1...3; 4...8; 0,5...2 и 10^{-10} ... 10^{-8} г/т, соответственно [2].

Одним из наиболее важных свойств атмосферы является её электропроводность, которая для приземной атмосферы, толщиной в несколько десятков метров, на ~80 % обеспечивается мгновенным значением концентраций ионов в воздухе, образованных полями ионизирующих излучений, генерируемых при распаде радиоактивных элементов, находящихся в почве и атмосфере [3]. В отсутствие сильных электрических полей образование и рекомбинация ионов обоих знаков создает равновесную концентрацию ионов. Известно, что в ионизацию приземной атмосферы вносят определенные вклады ионизирующие излучения, возникающие при распаде атмосферных радиоактивных газов и аэрозолей, почвенных радионуклидов, а также потоки излучений космического происхождения [3, 4]. Важно отметить, что вклад каждой из пере-

численных компонент детально не прорабатывался. Это связано с недостаточной изученностью функций распределения некоторых источников ионизации приземной атмосферы. В численных моделях электродного слоя [4] и глобальной электрической цепи [5] функция ионизации приземной атмосферы $q(z)$ задается либо в виде постоянной величины $q \sim 10^7$, $\text{м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$, либо соотношением [6, 7]:

$$q(z) = 7 \cdot 10^6 + Q_0 e^{-2,362z},$$

z — высота над земной поверхностью, Q_0 — «фоновая» объемная активность радона.

Первое слагаемое определяет величину плотности ионизации атмосферы излучением почвенных радионуклидов. Вместе с тем, вклад слагаемых в суммарную плотность ионизации атмосферы не постоянен, может меняться во времени и пространстве, напрямую определяется плотностью атмосферного воздуха, связанной с такими климатическими параметрами атмосферы, как температура, влажность и давление. Считается, что потоки космических излучений (наиболее изученная компонента) и излучение почвенных радионуклидов представляют собой слабо вариативную по времени компоненту плотности ионизации атмосферы, а радон и продукты его распада — компоненту с высокой вариативностью.

Основной задачей настоящей работы является моделирование вертикального профиля плотности ионизации атмосферы от распада почвенных радионуклидов, а также оценка вариативности почвенной компоненты в зависимости от изменения влажности почв (выпадения осадков) при постоянной плотности атмосферного воздуха.

Моделирование плотности ионизации приземной атмосферы

Моделирование вертикального распределения плотности ионизации атмосферы от ионизирующего излучения, возникающего при распаде почвенных радионуклидов, проведено с помощью ме-

тода Монте–Карло с использованием разработанной в ТПУ программы PCLab [8, 9]. Эта программа позволяет моделировать процессы переноса электронов, позитронов, фотонов в веществе и вычислять дифференциальные и интегральные характеристики поля ионизирующего излучения. При моделировании произведен учет вторичного излучения и каскадный характер взаимодействия излучения с воздухом. Для проведения расчетов, на основе данных МКРЗ 38 [10] и каталогов радионуклидов [11, 12], создана библиотека из 40 основных радионуклидов, повсеместно присутствующих в грунтах (табл. 1), с указанием их характеристик (постоянная радиоактивного распада, энергии испускаемых фотонов гамма-излучения, квантовый выход и пр.). Модельные оценки произведены с учетом векового радиоактивного равновесия между родоначальниками рядов и дочерними продуктами их распада.

Таблица 1. Радионуклиды, использованные в моделировании

Ряд ^{232}Th	^{232}Th , ^{228}Ra , ^{228}Ac , ^{228}Th , ^{224}Ra , ^{220}Rn , ^{216}Po , ^{212}Pb , ^{212}Bi , ^{208}Tl
Ряд ^{235}U	^{235}U , ^{231}Th , ^{231}Pa , ^{227}Ac , ^{223}Fr , ^{227}Th , ^{223}Ra , ^{219}Rn , ^{215}Po , ^{211}Pb , ^{211}Bi , ^{207}Tl , ^{211}Po
Ряд ^{238}U	^{238}U , ^{234}Th , $^{234\text{m}}\text{Pa}$, ^{234}Pa , ^{234}U , ^{230}Th , ^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po , ^{210}Pb , ^{210}Bi , ^{210}Po
Остальные	^{40}K , ^{137}Cs

Источник (грунт) и поглощающую среду (воздух) задавали в цилиндрической геометрии. Для расчетов был взят грунт, состав и параметры которого приведены в табл. 2. Глубина слоя грунта, выбранная для расчетов, составляла 50 см. Большие глубины не рассматривали, поскольку, согласно оценкам [13], основной вклад в дозу, а, следовательно, и в ионизацию приземного воздуха, вносят почвенные радионуклиды приповерхностного слоя, толщиной 5 см.

Все расчеты произведены до высоты 25 м, поскольку в дальнейшем планируется произвести сопоставление модельных оценок с экспериментальными данными по электрической проводимости и полям гамма-излучений, получаемыми в ходе согласованного многофакторного эксперимента ИМКЭС-ТПУ на серии высот до 25 м [14].

Таблица 2. Состав грунта [8]

Элемент	Атомный номер, Z	Атомная масса, A	Весовая доля, %
O	8	16	43,2
Si	14	28	20,2
Al	13	27	14,4
C	6	12	10,6
Fe	26	56	9,2
H	1	1	1,5
Ti	22	48	0,7
Mg	12	24	0,2

С помощью программы PCLab рассчитаны вертикальные распределения плотности ионизации

приземной атмосферы для каждого из радионуклидов, табл. 1. С целью оценок вкладов в плотность ионизации атмосферного воздуха от реальной концентрации радионуклидов в почве, все результаты получены в расчете на единичную активность радионуклидов (1 Бк/кг). Вертикальные профили плотности ионизации приземной атмосферы от разных радионуклидов единичной активности представлены на рис. 1, а.

Наибольший вклад в суммарную ионизацию вносит излучение радионуклидов природных семейств ^{238}U и ^{232}Th , а минимальное – излучение ^{40}K . Пересчет на реальную активность почвенных радионуклидов произведен с учетом экспериментальных данных по обследованию территории г. Томска, детально описанных в [1, 2, 15]. Средние для территории г. Томска значения удельной активности ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K и ^{137}Cs в приповерхностных грунтах и в почве составили 25; 26; 345 и 10 Бк/кг, соответственно [2]. Удельная активность ^{235}U определена из известного и практически неизменного соотношения изотопов $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}=137,88$. Таким образом, удельная активность ^{235}U в 21 раз меньше активности ^{238}U , и, в среднем для территории г. Томска в почве, составляет 1,2 Бк/кг. Результаты расчетов представлены на рис. 1, б. Изменение по высоте относительных вкладов каждого радионуклида (семейства) в суммарную ионизацию проиллюстрировано на рис. 1, в. Заметное различие относительных вкладов в плотность ионизации атмосферы в зависимости от высоты над земной поверхностью наблюдается только для ^{40}K и ^{238}U . Причем с увеличением высоты вклад от ^{40}K снижается, а от ^{238}U – увеличивается. Такое поведение объясняется разными энергиями испускаемых фотонов γ -излучения.

Вертикальные профили плотности ионизации приземной атмосферы, рассчитанные для указанных активностей почвенных радионуклидов, представлены на рис. 2. С учетом реальных активностей, максимальный и приблизительно равный вклад в суммарную ионизацию атмосферы вносят радионуклиды ^{40}K и ^{238}U в равновесии с дочерними продуктами распада. Суммарная плотность ионизации у земной поверхности составляет 2,4 пары ионов в 1 с в 1 см³, на высоте 1 м – 1,5 пары ионов, а на высоте 25 м плотность ионизации снижается практически на 2 порядка.

Поскольку плотность грунтов и почв на разных участках территории может изменяться в широких пределах, от 0,5 до 2 г/см³, то важно знать влияние плотности грунта на плотность ионизации вблизи земной поверхности.

Для различных значений плотности грунта распределение плотности ионизации, образованных излучением ^{137}Cs по высоте, иллюстрируется рис. 3, а. С увеличением плотности грунта распределение плотности ионизации вблизи земной поверхности изменяется незначительно. Однако с ростом высоты изменения возрастают до 10 % для ^{40}K и до 50 % для ^{137}Cs .

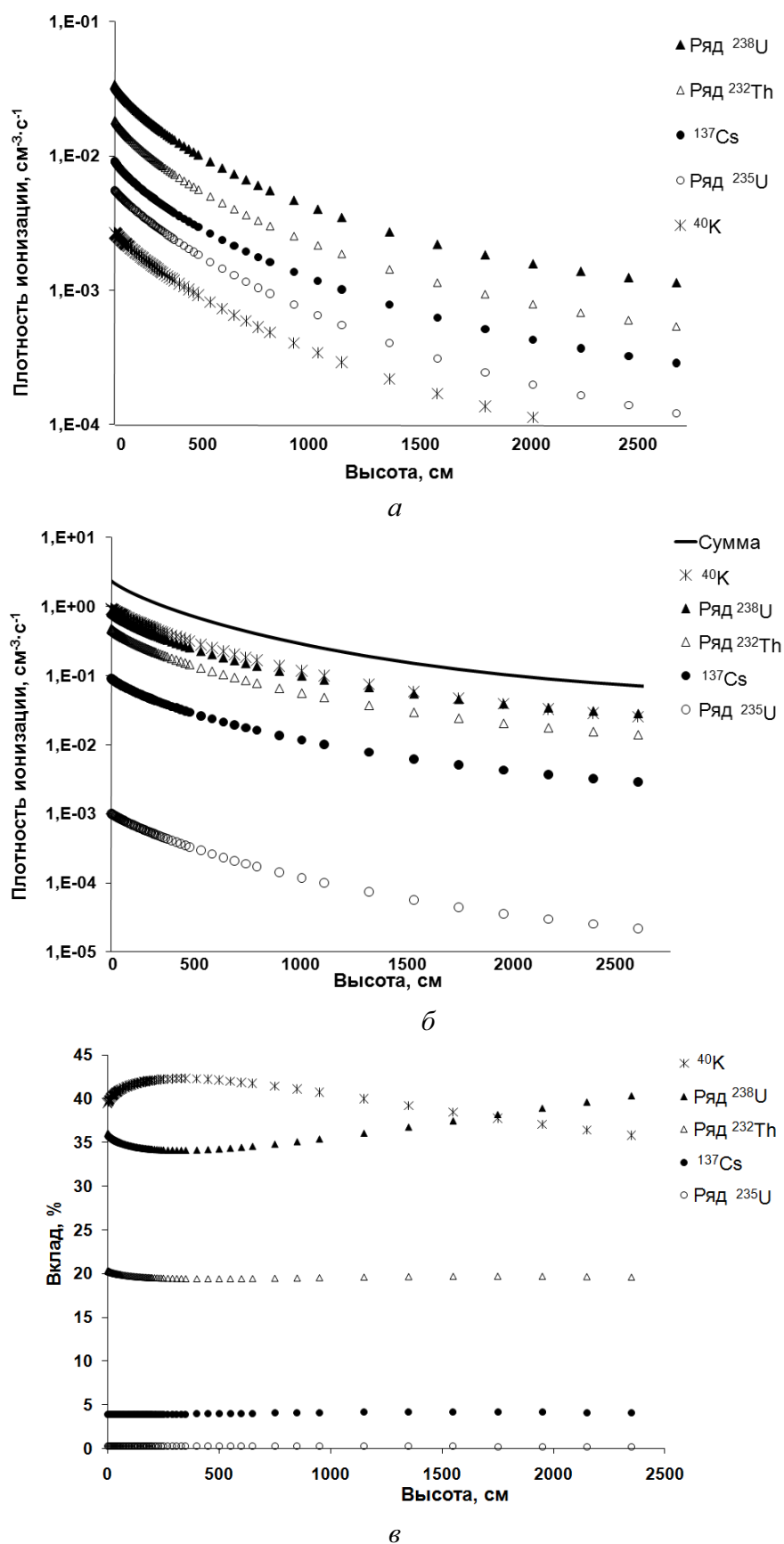


Рис. 1. Зависимость плотности ионизации атмосферы от высоты излучением почвенных радионуклидов в расчете на удельную активность: а) единичную; б) реальную; в) относительный вклад

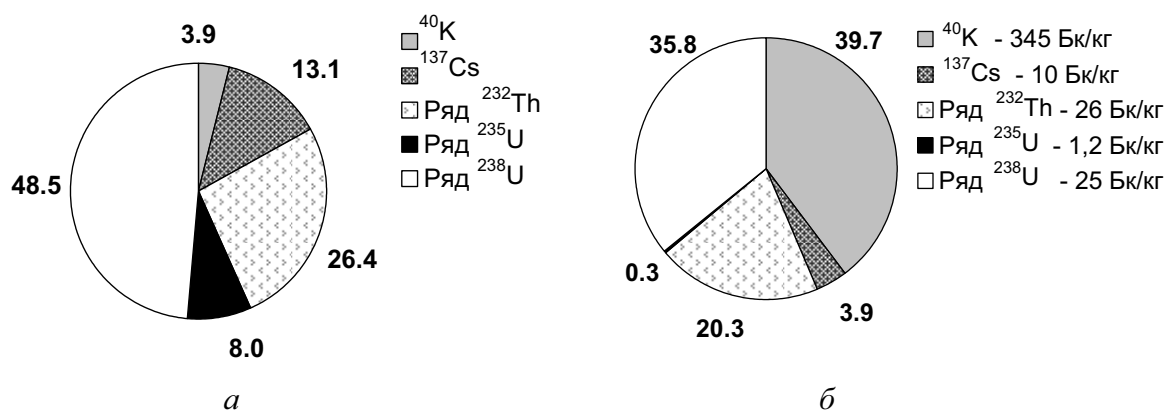


Рис. 2. Вклад почвенных радионуклидов в суммарную плотность ионизации приземной атмосферы на высоте 1 м в расчете на удельную активность: а) единичную; б) реальную

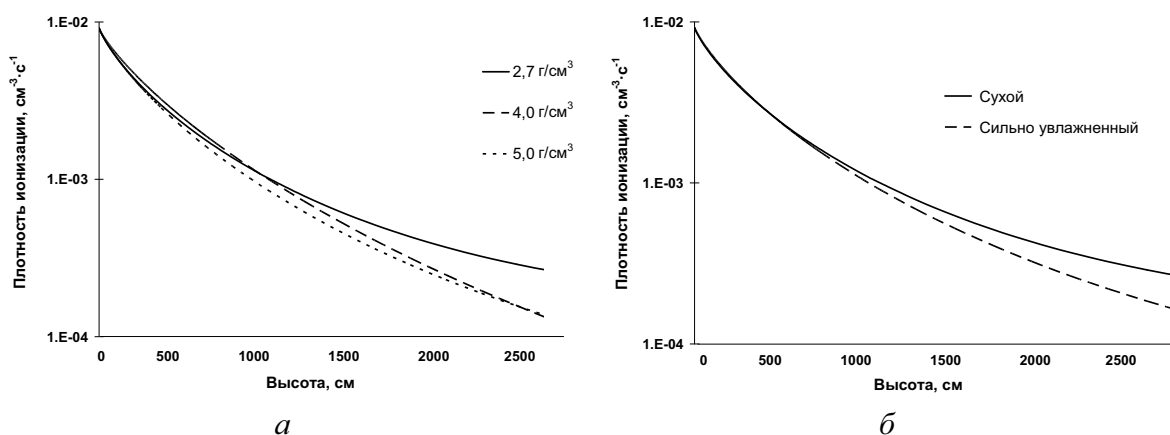


Рис. 3. Зависимость плотности ионизации атмосферы излучением ^{137}Cs от высоты для: а) различных значений плотности грунта; б) сухого и сильно увлажненного грунтов

Большое влияние на уровень ионизирующего излучения и ионизацию приземной атмосферы оказывает влажность грунта. Как показали экспериментальные данные по мониторингу γ - и β -полей на экспериментальной площадке ИМКЭСТПУ [14, 16], после дождя изменяется электропроводность атмосферы, которая зависит от плотности ионизации. В этой связи были произведены расчеты зависимости плотности ионизации от влажности грунта с пористостью 40 %. Результаты для ^{137}Cs представлены на рис. 3, б.

Из оценок следует, что ионизация от влажного грунта, поры которого полностью заполнены водой, меньше, чем от сухого. С ростом высоты эта разница увеличивается и на высоте 25 м достигает 50 %. Такое поведение объясняется экранирующими свойствами воды в приповерхностном грунте.

С целью дальнейшего совершенствования моделей электродного слоя и глобальной электрической цепи была предложена функция, описывающая ионизацию приземной атмосферы $q(z)$ излучением почвенных радионуклидов, состоящая из 5-ти слагаемых, определяемых удельными активностями ^{226}Ra (^{238}U), ^{232}Th , ^{40}K и ^{137}Cs .

Вертикальные распределения плотности ионизации атмосферы за счет почвенных радионуклидов были аппроксимированы функцией

$$q(z) = B e^{Cz + Dz^E},$$

где B – переменный коэффициент, зависящий от типа i -го радионуклида и его удельной активности A_i , Бк/кг (табл. 3); C , D и E – постоянные коэффициенты, зависящие от типа i -го радионуклида (табл. 3).

Таблица 3. Коэффициенты функции $q_i(z)$ для разных радионуклидов

Коэффициенты	^{40}K	^{137}Cs	Ряд ^{232}Th	Ряд ^{235}U	Ряд ^{238}U
B	$2,47 \cdot 10^{-3} \cdot A_{^{40}\text{K}}$	$8,42 \cdot 10^{-3} \cdot A_{^{137}\text{Cs}}$	$1,69 \cdot 10^{-2} \cdot A_{^{232}\text{Th}}$	$5,12 \cdot 10^{-3} \cdot A_{^{235}\text{U}}$	$3,12 \cdot 10^{-2} \cdot A_{^{238}\text{U}}$
C	$-6,34 \cdot 10^{-3}$	$-1,08 \cdot 10^{-1}$	$-8,81 \cdot 10^{-2}$	$-6,44 \cdot 10^{-3}$	$-0,155$
D	$9,91 \cdot 10^{-4}$	0,10	$7,91 \cdot 10^{-2}$	$9,99 \cdot 10^{-4}$	0,145
E	1,20	1,01	1,01	1,20	1,01

Анализ коэффициентов функций $q_i(z)$ табл. 3 показал, что суммарная функция плотности ионизации приземной атмосферы излучением почвенных радионуклидов определяется соотношением удельных активностей указанных радионуклидов. Анализ результатов моделирования также позволил определить, что вид функции $q(z)$ будет зависеть от типа грунта, т. е. его физических параметров (состав, плотность, пористость) и степени влажности.

Заключение

Анализ результатов расчетов с использованием метода Монте-Карло показал, что плотность ионизации приземной атмосферы излучением почвенных радионуклидов не является постоянной величиной, сильно зависит от высоты, а также таких факторов, как плотность, пористость, влажность

грунта и соотношение удельных активностей радионуклидов ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra (^{238}U), ^{40}K и ^{137}Cs в приповерхностном слое грунта.

В распределении плотности ионизации атмосферы по высоте от отдельных радионуклидов постоянный коэффициент при экспоненте определяется удельной активностью радионуклидов, а коэффициенты в показателе экспоненты – физическими параметрами грунта.

Использование традиционного представления об ионизации приземной атмосферы излучениями почвенных радионуклидов в численных моделях электродного слоя может привести к завышению результата до двух порядков по величине на высотах до 25 м.

Работа выполнена при поддержке проектов ФЦП № 02.740.11.0738 и СО РАН № 7.63.1.1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каратаев В.Д., Яковлева В.С., Эргашев Д.Э. Исследование радиоактивности объектов окружающей среды на территории Томской области // Известия вузов. Физика. – 2000. – Т. 43. – № 4. – С. 105–109.
2. Вертман Е.Г., Каратаев В.Д., Левицкий В.М., Эргашев Д.Э. Определение концентраций неравновесных изотопов урана в природных объектах ядерно-физическими методами // Аппаратура и новости радиационных измерений. – 2002. – № 3. – С. 34–43.
3. Смирнов В.В. Ионизация в тропосфере. – СПб.: Гидрометеопиздат, 1992. – 310 с.
4. Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М. Теория электродного эффекта в атмосфере. – Таганрог: ТРТИ, 1998. – 124 с.
5. Атмосфера. Справочник / под ред. Ю.С. Седунова. – Л.: Гидрометеопиздат, 1991. – 511 с.
6. Hess V.P., O'Donnel G.A. On the rate of ion formation at ground level and at one meter above ground // Journal of geophysical research. – 1951. – V. 56. – P. 557–562.
7. Hess V.P., Kisselbach, V.J., Miranda H.A. Determination of the alphas emission of materials constituting the earth's surface // Journal of geophysical research. – 1956. – V. 61. – P. 265–271.
8. Беспалов В.И. Пакет программ ЕРНСА для статистического моделирования поля излучения фотонов и заряженных частиц // Известия вузов. Физика. – 2000. – Т. 43 – № 4. – С. 159–165.
9. Беспалов В.И. Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 369 с.
10. Программа ICRP38 // ORNL Center for Biokinetic and Dosimetric Research. 2009. URL: <http://ordose.ornl.gov> (дата обращения: 11.04.2009).
11. Gamma-Ray Spectrum Catalogue // Региональная объединенная компьютерная сеть образования, науки и культуры Санкт-Петербурга. 2009. URL: <http://www.atom.nw.ru/catalog/nucleides.htm> (дата обращения: 11.04.2009).
12. BetaSpecALL FINAL3.xls // the RADIATION DOSE ASSESSMENT Resource. 2009. URL: <http://www.doseinfo-radar.com> (дата обращения: 18.04.2009).
13. Беспалов В.И., Кольчужкин А.М., Кондратьева А.Г., Сирица О.Б. Дистанционная спектрометрия гамма-излучения // Научная сессия МИФИ-2003. Сб. научных трудов. – 2003. – Ч. 2. – С. 73–74.
14. Яковлева В.С., Каратаев В.Д., Вуколов А.В., Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Нагорский П.М., Смирнов С.В., Фирстов П.П., Паровик Р.И. Методология многофакторного эксперимента по процессам переноса радона в системе «литосфера – атмосфера» // Аппаратура и новости радиационных измерений. – 2009. – № 4. – С. 55–60.
15. Эргашев Д.Э. Метод определения естественного и техногенного урана в объектах окружающей среды: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Томск: ТПУ, 2004. – 221 с.
16. Яковлева В.С., Плужникова Д.А., Нагорский П.М., Каратаев В.Д. Модель плотности ионизации атмосферы за счет радона, торона и продуктов их распада // Аэрозоли Сибири: Матер. XVI рабочей группы. – Томск, 24–27 ноября 2009. – Томск: ИОА СО РАН, 2009. – С. 40.

Поступила 17.05.2010 г.